福建耕地土壤磷素富集空间差异及其影响因素

詹秋丽[(1,2)];张黎明[(1,2)];周碧[(2)];巫顺金[(1,2)];邢世和[(2)]

（1）福建农林大学资源与环境学院　福州　350002; (2)土壤生态系统健康与调控福建省高校重点实验室　福州　350002

摘　要: 利用1∶25万福建省耕地土壤类型空间数据库以及1982年1 676个和2008年200 322个耕地土壤调查样点数据资料，借助GIS技术与灰色关联分析模型探讨了26年间研究区耕地土壤有效磷富集程度空间差异及其影响因素。结果表明: 26年来福建省耕地土壤有效磷呈明显富集趋势，全省92.81%的耕地有效磷处于不同程度富集状态，有效磷平均富集量和年均富集率分别高达24.38 mg·kg^{-1}和10.01%，并呈较明显的空间差异。地处南亚热带的厦门市耕地有效磷富程度最大，中亚热带的南平市富集程度最小；有效磷富集程度较高的土类为紫色土、潮土、水稻土和赤红壤，较小的土类为滨海盐土和石灰土；富集程度较大的亚类包括淹育水稻土、灰潮土和漂洗水稻土，较小的亚类包括棕色石灰土和滨海盐土。研究区耕地土壤磷素富集及其空间差异主要受年均磷肥施用量、pH、年均气温和黏粒含量显著影响，灰色关联系数>0.722。根据研究区耕地土壤磷素富集程度及其空间差异制定磷肥优化管理措施是十分必要的。

关键词: 耕层土壤; 有效磷; 富集量; 富集率; 灰色关联分析; GIS

中图分类号: S15　　**文献标识码**: A

Spatial difference of phosphorus accumulation and its affecting factors in cultivated land of Fujian[*]

ZHAN Qiuli[1,2], ZHANG Liming[1,2], ZHOU Biqing[2], WU Shunjin[1,2], XING Shihe[2**]

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. University Key Laboratory of Soil Ecosystem Health and Regulation in Fujian Province, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Phosphorus is one of the largest nutrient elements needed by plants. Under the intensive production conditions, most of farmland soils in China have emerged the phenomenon of phosphorus enrichment. This is mainly due to excessive application of phosphate fertilizers, the strong fixation and inefficient use of phosphorus. The enrichment of phosphorus in cropland soils is one of the important reasons caused nonpoint pollution and has also restricting the sustainable development of agriculture in China. In this study, based on a 1∶250 000 spatial database of farmland soil types and the available phosphorus data of cultivated soil samples (1 676 samples in 1982 and 200 322 samples in 2008) in Fujian Province, the spatial difference of phosphorus enrichment degree and its influencing factors in cultivated land during the past 26 years were studied and discussed by GIS technology integrated with grey correlation analysis model. The aim of the study was to uncover the enrichment characteristics of soil available phosphorus, spatial variability and its influencing factors, so as to improve the efficiency of phosphorus use and reduce the application of phosphate fertilizer in cultivated land soils. The results showed that the soil available phosphorus was abundant in Fujian Province during the past 26 years. In addition, the soil available phosphorus enrichment area reached 1 216 777 hm^2, accounting for 92.81% of the total area of cultivated land in the province, whereas the yearly average enrichment amounts and rates of available phosphorus were 24.38 mg·kg^{-1} and 10.01%, respectively, which showed obvious spatial difference. The cropland soils in Xiamen, located in the southern subtropics, showed the largest degree of effective phosphorus enrichment, while those in Nanping located in the mid-subtropics showed the lowest degree of effective phosphorus enrichment in Fujian Province. The soil types with high effective phosphorus enrichment included Purplish soils, Fluvo-aquic soils, Paddy soils and Latosolic red soils and those with less effective phosphorus enrichment included Coastal Solonchaks and Calcareous soils. Soil subtypes with larger degrees of available phosphorus enrichment included Submergenic paddy soils and Bleached paddy soils, and those with lower levels of available phosphorus enrichment included Brown calcareous soil and Coastal Solonchaks. In general, the available phosphorus in the soil layer has the characteristics of large enrichment area, wide distribution range and significant spatial difference. The results by grey correlation model analysis showed that the soil available phosphorus enrichment and its spatial difference were mainly affected by annual application rate of annual phosphate fertilizer, pH, annual mean temperature and clay content, the grey correlation coefficients of these influencing factors were higher than 0.722. However, the effect of sand, annual precipitation and organic matter on the phosphorus enrichment of cultivated soil in the study area was relatively weaker. The gray correlation coefficients of these influencing factors were lower than 0.720. Based on the degree of phosphorus enrichment and spatial difference, inorganic phosphate fertilizer management measures and strictly control the use of it can play a key role in dealing with the effective phosphorus enrichment of cultivated soil in Fujian Province. At the same time, it was also essential to optimize the fertilization management plan by increasing organic fertilizer and reducing chemical fertilizer.

keywords: Tillage soil; Effective phosphorus; Enrichment amount; Enrichment rate; Grey correlation analysis; GIS

磷(P)是植物生长发育必要的大量营养元素之一。已有研究表明, 1961—2011 年中国农田磷投入量增加了 7.93 倍, 积累量达到 71.18 Mt P[1]; 随着磷肥的持续施用, 农田土壤磷素还将不断累积[2], 当累积超过一定限度, 磷素可通过径流、渗透、淋溶等途径向水体迁移, 对水体环境产生严重危害[3]。因此, 科学揭示区域耕地土壤磷素富集程度的空间差异及其影响因素, 减缓农田土壤磷素富集, 对实现农业可持续发展和环境保护具有重要的理论和现实意义。

国内外学者已对土壤磷素含量空间分异及影响因素进行了较多研究。全球尺度上, Sattari 等[4]指出中欧用于农业领域的磷肥比其收获作物中的磷含量多了许多倍, 导致土壤中的磷大量积累; Tóth[5]和 Schoumans[6]等则将研究区域扩大至全欧洲, 指出过度粪肥应用导致欧洲农用地中磷积累增加。国家尺度上, Nieder 等[7]指出 2010 年德国农田磷累积量约为 1 100 kg·hm^{-2}, 大大超过农田负荷量; Reijineveld 等[8]研究表明, 20 世纪初到 50 年代荷兰农业用地中磷盈余从 11 kg·hm^{-2} 上升到 17 kg·hm^{-2}, 20 世纪 80 年代达 34 kg·hm^{-2}, 至 2008 年下降到 17 kg·hm^{-2}; 方玉东等[9]研究指出我国农田土壤磷盈余程度为东部>中部>西部。行政区域尺度上, 麻万诸等[10]研究表明浙江省近几年耕地地力调查中土壤有效磷均值为 25.43 mg·kg^{-1}, 明显高于第二次土壤普查期间的均值 5.66 mg·kg^{-1}; 张慧等[11]研究表明 2001—2007 年北京房山区农田磷素积累表现为南高北低, 东南和西南部地区增速较快; 金明清等[12]发现 1984—2010 四川省不同区域的耕地土壤有效磷变化速率存在差异, 施肥方式和土壤自身性质对土壤有效磷空间演变影响显著。袁大刚等[13]研究表明南京市 3 种土地利用方式下土壤全剖面磷含量明显高于中国和世界非城市土壤的平均水平; 陈玉东等[14]研究发现黑龙江海伦市 2008、2009 年农田土样的有效磷含量明显高于第二次土壤普查的含量, 与耕作历史及耕作方式等密切相关。于洋等[15]基于渭北台塬区耕地土壤 1980 年和 2011 年两个时期的实测样点数据分析发现, 人为活动是影响土壤有效磷时空变化的重要因素。可见, 国内外已有的相关研究主要聚焦于采用简单的统计分析方法开展农田土壤磷素含量及其影响因素研究[16-17], 基于 GIS 与数学模型集成技术开展区域耕地土壤磷素富集的空间差异及其影响因素的研究尚少见报道。如何借助区域空间信息和土壤检测大数据挖掘、结合模糊数学方法揭示区域耕地土壤磷素富集空间分异特征及其影响因素的研究有待于进一步深入。为此, 本研究借鉴国内外学者在大数据挖掘和 GIS 技术领域的研究经验, 基于农业部耕地质量调查的大量源数据, 以地处亚热带地区的福建省耕地土壤为研究对象, 利用全省 1982 年 1 676 个和 2008 年 200 322 个耕地土壤调查样点有效磷分析数据和 1∶25 万耕地土壤类型空间数据库, 基于 GIS 与地统计学和灰色关联模型集成技术, 以有效磷富集率和富集量为指标, 探讨 26 年来亚热带地区省域耕层土壤有效磷的富集特征、空间差异及其影响因素, 为省域耕地土壤制定合理的磷肥优化管理措施、防控磷素迁移所致的环境风险等提供科学依据。

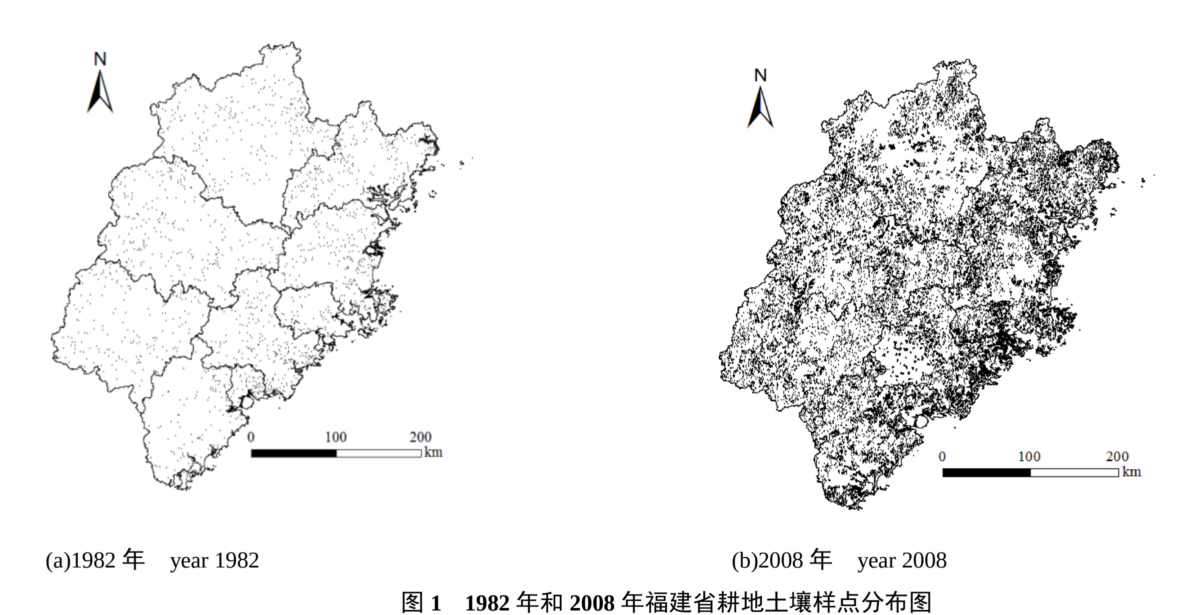
1 材料与方法

1.1 研究区概况

福建省位于我国东南沿海, 地处 23°33′~28°20′N, 115°50′~120°40′E, 属亚热带海洋性季风气候, 年均温 14.6~21.3 ℃, ≥10 ℃活动积温高达 5 000~7 800 ℃, 年均降水量 1 037~2 051 mm。地形以山地丘陵为主, 地势总体呈东南低, 西北高, 境内水热条件垂直分带较明显[18]。福建有 9 个土类(赤红壤、红壤、黄壤、紫色土、石灰土、风砂土、潮土、滨海盐土、水稻土)和 14 个亚类。2008 年末福建全省耕地土壤总面积 1.31×10^6 hm^2。

1.2 数据来源

福建省 1∶25 万耕地土壤类型图数据库来自农业部耕地质量调查与评价项目; 1982 年 1 676 个耕层土壤样点数据由福建省第二次土壤普查县(市、区)剖面样点中提取(图 1a), 2008 年 200 322 个耕地耕层土壤样点数据来自农业部耕地质量调查与评价项目(图 1b), 两期土壤调查样点相关属性均采用相同的土壤农业化学分析方法测定, 其中有效磷均采用碳酸氢钠提取—钼锑抗比色法测定; 磷肥施用量来自 1983—2009 年以县为统计单位的福建省农村经济统计年鉴; 年均降水量、年均气温等数据来自福建省气象局 66 个气象站点近 30 年的观测数据资料。



(a)1982 年　year 1982　　　　(b)2008 年　year 2008

图 1　1982 年和 2008 年福建省耕地土壤样点分布图

Fig. 1　Distribution of cropland soil sampling sites in Fujian province in 1982 and 2008

1.3　耕地土壤相关属性空间数据库建立

以 1∶25 万福建省耕地土壤类型矢量数据图层为基础图层，根据 1982 年全国第二次土壤普查《土种志》中记录的剖面点详细采样位置，以村界为限定区域，找出与该剖面土壤类型一致的土壤图最大面积“图斑”，“图斑”的中心点即认为是二普剖面采集位置。根据剖面样点采集位置将 1 676 个样点逐一转绘到耕地土壤类型矢量数据图层，生成 1982 年福建省土壤普查调查样点空间数据图层，然后采用反距离权重插值模型[19]将有效磷样点数据拓展为面数据，建立有效磷空间属性数据库。同样, 2008 年调查样点的 GPS 定位坐标采用反距离权重插值模型将有效磷样点数据拓展到面数据，建立 2008 年福建省土壤有效磷空间属性数据库。将 66 个气象站点数据通过 GPS 定位坐标采用三维趋势面分析结合反距离权重插值残差订正模型[20]进行福建省年均气温和年均降水量栅格空间属性数据推算，建立全省年均气温和年均降水量空间属性数据库。采用反距离权重插值模型进行福建省耕层土壤的 pH、有机质、砂粒、粉粒、黏粒等栅格空间属性数据推算并建立相关属性空间数据库。利用福建省耕地土壤类型空间数据图层分别掩膜上述属性栅格空间数据图层，并以耕地土壤亚类图斑为评价单元，计算建立研究区耕地评价单元有效磷、pH、有机质、砂粒、粉粒、黏粒、年均气温和年均降水量等属性空间数据库。利用以县为统计单位的年均磷肥施用量数据资料，采用人机对话赋值法建立福建省耕地评价单元年均磷肥施用量空间属性数据库。

1.4　耕地土壤有效磷富集程度空间数据库建立

本研究以富集量(EQ)和富集率(ER)为衡量指标[21]，揭示耕地土壤有效磷富集程度的空间差异。具体计算公式分别为:

$$EQ = Xs - Xo \qquad ER = (Xs - Xo) / Xo$$

式中: EQ 和 ER 分别为评价单元有效磷富集量和富集率; *Xs* 为 2008 年评价单元有效磷含量; *Xo* 为 1982 年评价单元有效磷含量。利用上述建立的 2008 年和 1982 年福建省耕地土壤有效磷空间数据图层，借助 ArcGIS 10.2 软件计算并建立福建省耕地土壤有效磷富集量和富集率空间数据库。评价图斑 2008 年平均含量减 1982 年平均含量大于 0 mg·kg^{-1}(即 EQ>0)，以及富集率大于 0%(即 ER>0)被认为是富集，该图斑面积算入富集面积。

1.5　耕地土壤有效磷富集影响因素分析

根据耕地土壤磷素平衡理论，可能影响土壤有效磷富集的因素包括土壤内在属性(如砂粒、粉粒、黏粒、pH 和有机质等)和外在因素(如年均气温、年均降水量和年均磷肥施用量等)[22-27]。从福建省耕地土壤有效磷富集空间数据库分别提取出各评价单元的有效磷富集量，建立福建省耕地土壤有效磷富集量(即因变量)数列，从影响耕地土壤有效磷富集因素空间数据库提取出相应评价单元的砂粒、粉粒、黏粒、pH、有机质、年均气温、年均降水量和年均磷肥施用量数据，建立福建省耕地土壤有效磷富集影响因素(即自变量)数列。借助 DPS 统计软件的灰色关联度分析模型，分辨系数取 0.2，计算有效磷富集量与相关影响因子的关联度系数，分析相关因子对土壤有效磷富集的影响程度及差异。

1.6　图件编制与数据统计分析

利用ArcGIS 10.2软件编制福建省有效磷富集程度空间分布图，采用Excel 2010进行数据的常规统计分析。

2 结果与分析

2.1 福建省耕层土壤有效磷富集空间差异

2.1.1 耕层土壤有效磷富集总体特征

研究结果表明(图 2), 26 年间福建省多数区域耕层土壤有效磷含量均有不同程度增加，总体呈富集状态。与1982年相比, 2008年福建省耕层土壤有效磷富集量平均高达24.38 mg·kg^{-1}，富集面积为1.22×10^{6} hm^{2}，占全省耕地总面积的 92.81%。省域范围内耕地土壤有效磷富集程度空间差异较显著, 1982—2008 年全省耕层土壤有效磷富集量的变异系数高达 71.25%。从富集量大小空间差异分析来看，全省大部分耕地土壤有效磷富集量低于 20 mg·kg^{-1}，占全省有效磷富集耕地总面积的 50.87%，主要分布于福建省东部、西部、中部和北部；富集量介于 20~50 mg·kg^{-1} 的中度富集耕地土壤在全省各设区市均有块状分布，占全省有效磷富集耕地总面积的 36.75%；富集量大于 50 mg·kg^{-1} 的耕地占全省有效磷富集耕地总面积的 12.38%，主要分布于福建省南部。总体来看，研究区耕地耕层土壤有效磷具有富集面积大、分布范围广、空间差异显著等特点 。

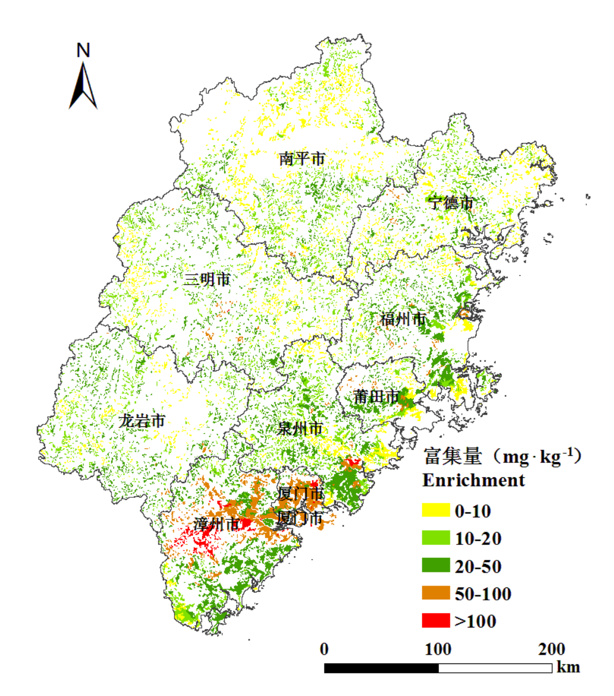


图 2 福建省 1982—2008 年耕层土壤有效磷富集量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of topsoil available phosphorus enrichment quantity in Fujian province from 1982 to 2008

2.1.2 不同行政区耕层土壤有效磷富集差异分析

26 年来福建省各地级市耕地土壤有效磷总体呈富集状态，且有效磷富集程度差异明显。从富集率差异来看(图 3)，厦门和漳州两市耕地土壤有效磷年均富集率显著高于其他地级市，均≥28.40%，远高于全省平均水平 10.01%；三明、泉州、福州和龙岩四市耕地土壤有效磷年均富集率居中，介于 7.45%~9.46%，略低于全省平均水平；而南平、宁德和莆田三市耕地土壤有效磷年均富集率相对较低，均≤5.50%，仅为全省平均水平的 34.47%~54.95%。各地级市耕地土壤有效磷富集量差异趋势与富集率基本一致(图 3)，厦门和漳州两市富集量颇为可观，均≥51.91 mg·kg^{-1}，比全省平均水平(24.38 mg·kg^{-1})高出 27.53 mg·kg^{-1}；三明、莆田、龙岩、福州和泉州五市耕地土壤有效磷富集量介于 18.2~22.82 mg·kg^{-1}，略低于全省平均水平；而南平和宁德两市的富集量远低于全省平均水平，介于 8.67~14.34 mg·kg^{-1}，仅为全省平均水平的 35.56%~58.82%。就有效磷富集面积比例差异而言(图 4)，除莆田和南平市外，其余各地级市耕地土壤有效磷富集面积均占各地级市耕地总面积的 90%以上，以厦门、漳州和三明三市有效磷富集面积比例最高。可见，26 年间福建省耕地土壤有效磷富集程度以位于南部的厦门和漳州两市最为显著，位于东部和北部的宁德和南平两市则相对较弱。

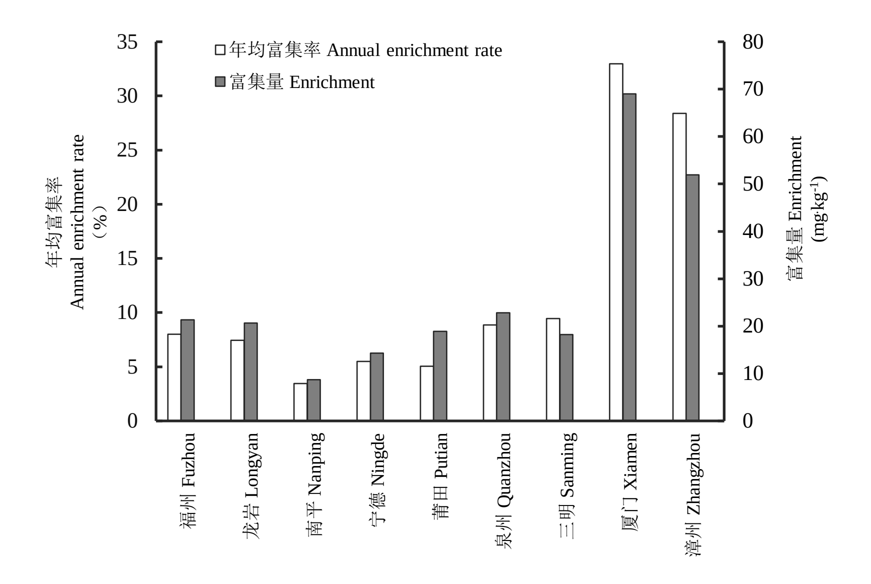


图 3　福建省各地级市耕层土壤有效磷年均富集率和富集量

Fig. 3　Annual enrichment rate and enrichment of available phosphorus in cultivated land of Fujian Province

表 1　福建省各地级市耕层土壤有效磷富集面积及其比例

Table 1　Soil available phosphorus enriched area and its proportion in cultivated soil of Fujian Province

行政区 Administrative area	有效磷富集 Available phosphorus enrichment		行政区 Administrative area	有效磷富集 Available phosphorus enrichment	
	富集面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)		富集面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)
福州 Fuzhou	131 231	90.62	泉州 Quanzhou	188 684	96.03
龙岩 Longyan	121 406	97.52	三明 Sanming	155 039	99.97
南平 Nanping	202 302	81.10	厦门 Xiamen	38 908	100.00
宁德 Ningde	115 926	94.44	漳州 Zhangzhou	215 342	99.96
莆田 Putian	47 938	75.37			

2.1.3　不同土壤类型耕层土壤有效磷富集空间差异

研究表明(表 2)，福建省各土类耕层土壤有效磷呈现富集状态，不同土类间富集程度差异较大。从富集率和富集量差异来看(图 3)，有效磷富集率和富集量均以紫色土、潮土、水稻土和赤红壤四个土类较大，有效磷年均富集率和富集量分别≥8.90%和≥24.50 mg·kg^{-1}；有效磷富集率和富集量较小的土类为滨海盐土和石灰土，其年均富集率和富集量分别≤1.96%和≤4.10 mg·kg^{-1}；其余土类的有效磷富集量和富集率分别介于 3.63~8.18%和 14.16~17.02 mg·kg^{-1}。从有效磷富集面积比例差异而言(表 2)，除滨海盐土和风砂土的富集面积比例相对较小(≤78.97%)外，其余土类耕地土壤有效磷富集面积均占相应土类总面积的 87.51%以上，其中以黄壤、石灰土和紫色土的有效磷富集面积比例最高。

从耕地土壤亚类来看(表 2)，有效磷富集率和富集量较大的为淹育水稻土、灰潮土和漂洗水稻土，其有效磷富集率和富集量分别≥12.69%和≥32.51 mg·kg^{-1}；有效磷富集率和富集量较小的亚类主要包括棕色石灰土和滨海盐土，富集率和富集量分别不及全省耕地土壤均值的 19.58%和 16.82%；其余亚类有效磷富集率和富集量介于上述两者之间，大致与全省耕地土壤平均水平(分别为 10.01%和 24.38 mg·kg^{-1})相当。从有效磷富集面积比例差异而言(表 2)，除滨海盐土和耕作风砂土的富集面积比例较小外，其余耕地土壤亚类有效磷富集面积均占相应亚类总面积的 86.59%以上，其中以黄壤、酸性紫色土和棕色石灰土亚类的有效磷富集面积比例最高。

综上所述，福建省耕地土壤有效磷富集程度较显著的土类主要包括潮土、紫色土和水稻土，亚类主要包括淹育水稻土、灰潮土和漂洗水稻土；而富集程度较小的土类为滨海盐土和石灰土，亚类为滨海盐土和棕色石灰土。

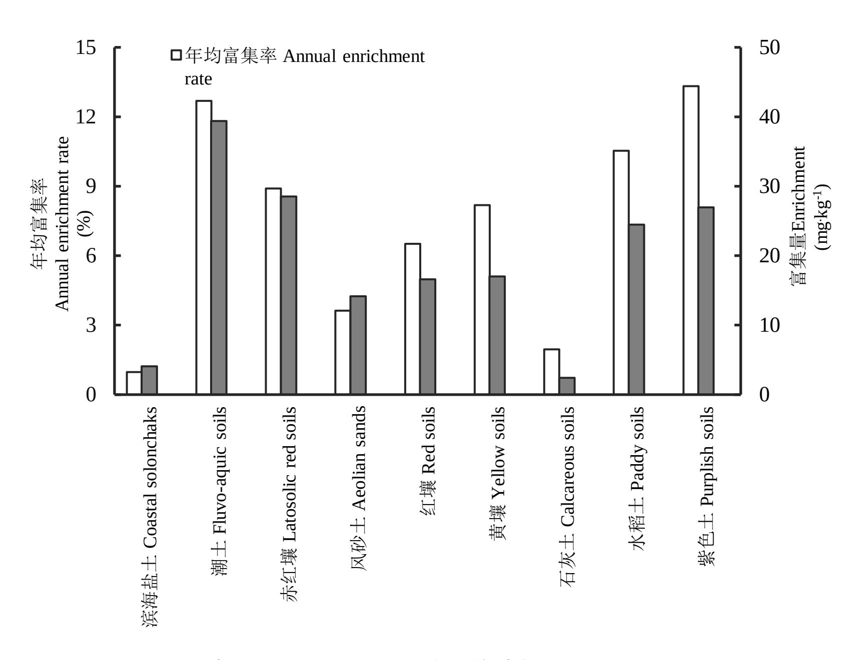


图 4　福建省不同土类耕层土壤有效磷年均富集率和富集量

Fig. 4　Annual enrichment rate and quantity of topsoil available phosphorus in different soil types of Fujian province

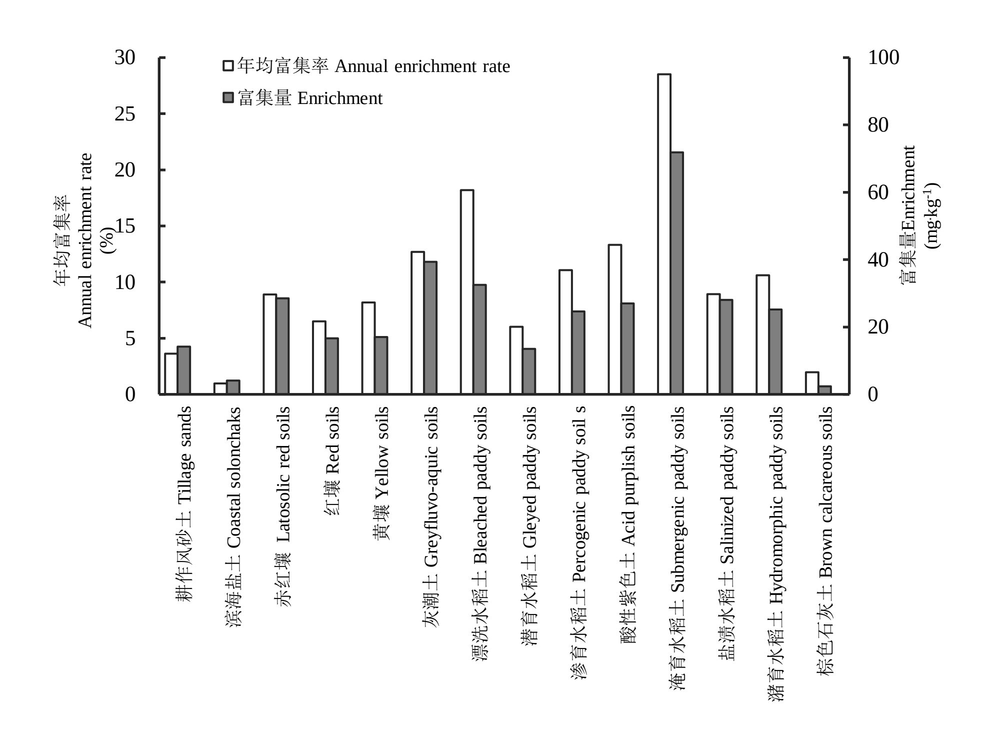


图 5　福建省不同亚类耕层土壤有效磷年均富集率和富集量

Fig. 5　Annual enrichment rate and quantity of topsoil available phosphorus in different soil subtypes of Fujian Province

表 2　福建省耕地土壤类型有效磷富集面积及其比例

Table 2　Enrichment area and proportion of available phosphorus in cropland soil of Fujian Province

土类 Soil group	有效磷富集 Effective phosphorus enrichment 面积 Area (hm^2)	比例 Proportion (%)	亚类 Subclass	有效磷富集 Effective phosphorus enrichment 面积(hm^2) Area	比例 Proportion (%)
滨海盐土 Coastal solonchaks	2 427.59	58.52	滨海盐土 Coastal solonchaks	2 427.59	58.52

潮土 Fluvo-aquic soils	10 930.62	98.01	灰潮土 Greyfluvo-aquic soils	10 930.62	98.01
赤红壤 Latosolic red soils	94 126.19	87.51	赤红壤 Latosolic red soils	94 126.19	87.51
风砂土 Aeolian sand	12 588.97	78.97	耕作风砂土 Tillage sand	12 588.97	78.97
红壤 Red soils	82 940.10	92.13	红壤 Red soils	82 940.10	92.13
黄壤 Yellow soils	10 678.00	100.00	黄壤 Yellow soils	10 678.00	100.00
石灰土 Calcareous soils	135.53	100.00	棕色石灰土 Brown calcareous soil	135.53	100.00
水稻土 Paddy soils	1 004 449.97	93.87	漂洗水稻土 Bleached paddy soils	14 375.34	97.45
			潜育水稻土 Gleyed paddy soils	106 805.61	86.59
			渗育水稻土 Percogenic paddy soils	415 455.67	95.24
			淹育水稻土 Submergenic paddy soils	11 593.71	98.53
			盐渍水稻土 Salinized paddy soils	44 186.06	87.10
			潴育水稻土 Hydromorphic paddy soils	408 688.92	94.33
紫色土 Purplish soils	1 347.00	100.00	酸性紫色土 Acid purplish soils	1 347.00	100.00

2.2 耕地土壤有效磷富集主要影响因素

灰色关联分析结果表明(表3)，研究区耕地土壤有效磷富集的影响因素大体可分为3类，其中以年均磷肥施用量对研究区耕地土壤磷素富集作用影响最为显著，灰色关联度系数>0.805；其次是 pH、年均气温、黏粒和粉粒，灰色关联度系数介于 0.721~0.762；而砂粒、年均降水量和有机质含量对研究区耕地土壤磷素富集作用影响相对较弱，灰色关联度系数<0.720。可见，年均磷肥施用量是影响研究区耕地土壤磷富集的最关键因子；pH、年均气温、黏粒和粉粒含量是影响研究区耕地土壤磷富集的一般因子，而砂粒、年均降水量和有机质含量是影响研究区耕地土壤磷素富集的次要因子，其中以有机质含量对耕地土壤磷素富集的影响作用最弱。

表 3　耕地土壤磷素富集量与影响因素的灰色关联分析

Table 3　Grey correlation analysis of phosphorus Enrichment and possible impact factors in cropland soil

影响因子 Impact factor	关联系数 Grey correlation coefficient	影响因子 Impact factor	关联系数 Grey correlation coefficient
pH	0.762 0	砂粒 Sand	0.719 8
年均磷肥施用量 Annual Phosphate Application	0.805 4	粉粒 Powder	0.721 5
年均气温 Annual average temperature	0.729 7	黏粒 Clay	0.722 7
年均降水量 Annual rainfall	0.707 8	有机质 Organic matter	0.690 5

3 讨 论

3.1 外在因素对耕地土壤有效磷富集差异的影响

有研究表明，长期施肥会对土壤磷素含量及分布状况产生影响[28]，施入农田的磷肥有 38%~60%会转化为全磷富集在 0~40 cm 土壤中，持续施用将显著促进土壤中磷素积累[29]，故耕地磷肥施用量的高低及其差异必然成为区域耕地土壤磷素富集作用最重要的影响因素。调查表明，福建省农业生产中实际磷肥投入量远高于作物需求量，且不同区域磷肥施用量存在明显差异[30]，致使全省耕地土壤磷素富集较为显著，并呈现出明显的空间差异。据福建省农村经济年鉴资料统计，近 26 年来福建省磷肥施用量持续增长, 2008 年施用量高达 1.7×10^5 t，是 1982 年的 2.13 倍，且以酸性过磷酸钙为主，易被土壤吸附固定而富集。厦门和漳州两市近 26 年来年均磷肥施用量介于 0.032~0.061 $t\cdot hm^{-2}$，明显高于其他设区市的年均磷肥施用量(0.012~0.028 $t\cdot hm^{-2}$)，致使两市耕地土壤有效磷富集最为显著；而南平和宁德两市有效磷富集程度最低，有效磷富集量不足全省平均富集量的 36%，主要是由于近 26 年来两市的年均磷肥施用量仅分别为 0.022 和 0.012 $t\cdot hm^{-2}$，明显低于绝大多数设区市的磷肥施用水平。从不同土壤类型来看，全省耕地土类中有效磷富

集程度最大的是潮土，主要是由于该土类多分布于地势平坦、交通便利的平原和盆地区的河流沿岸和居民点周边，且多已辟为蔬菜用地，耕地磷肥施用量较高，致使其有效磷富集明显，有效磷富集量高达 39.38 mg·kg^{-1}，远高于其他土类的富集水平；而发育于滩涂母质的滨海盐土由于其含盐量较高、农作物产量低导致耕作经营较粗放，磷肥施用量较低，致使其有效磷富集程度最低。因此，年均磷肥施用量对研究区耕地土壤磷素富集作用及其差异的影响最为显著。

在土壤形成发育过程中，气候要素(如降水和温度)主要通过影响土壤矿物风化速率和养分淋溶强度而间接影响土壤磷素含量[31]。有研究表明，中国土壤磷密度与年均温和年均降水量具有显著相关性[32]。福建省地处中、南亚热带气候区，境内峰岭耸峙，山丘连绵，海拔高差达 2 176 m，致使辖区内水热空间分布差异明显，9 个设区市间年均温差达 3.7 ℃，年均降水量相差 342 mm，导致不同区域成土过程中矿物风化和脱硅富铁铝作用差异明显，从而影响境内耕地土壤有效磷的富集状况。从本研究结果的总体分析来看，分布于南亚热带地区的耕地土壤有效磷富集程度明显高于中亚热带地区，如位于南亚热带厦门市的耕地有效磷富集量是位于中亚热带南平市的 7.96 倍。主要是由于南亚热带地区的漳州、厦门、泉州、莆田等市的年均气温较高，土壤形成和发育过程中矿物风化和脱硅富铁铝作用强烈，导致铁铝氧化物富集而促进磷素的富集作用，致使上述区域大部分耕地有效磷富集量超过 50 mg·kg^{-1}，厦门、漳州二市更有部分耕地有效磷富集量高达 100 mg·kg^{-1} 以上。而位于中亚热带地区的南平、宁德、三明和龙岩市(尤其是海拔大于 500 m 区域)的耕地土壤有效磷富集程度较低，主要是因为气温相对较低导致矿物风化和脱硅富铁铝作用相对较弱，故磷素富集程度也相对较低。表 3 结果发现年均降水量与有效磷富集量的灰色关联度低于年均气温而成为次要影响因子，主要原因是研究区不同区域降水量虽有一定差异，但总体均达较高水平。有研究表明磷在土壤中属于较难迁移的元素[33]，降水量对土壤磷素的淋失影响程度较低，故导致研究区降水量差异对耕地土壤有效磷富集作用影响不明显。

3.2　内在属性对耕地土壤有效磷富集差异的影响

土壤酸碱性对元素的存在形态、释放、固定和迁移等均有重要影响，是影响土壤磷素吸附固定作用的重要因子，进而影响土壤磷素的富集作用。当土壤 pH<5.5 时，易产生铁、铝对土壤磷素的吸附固定作用；pH>7.5 时，则易产生钙对土壤磷素的吸附固定作用[34]。福建省耕地土壤 pH 介于 3.42~6.20，有 96.31%的耕地属于酸性土壤(pH<6.5)[18]，磷素吸附固定作用较强，致使施用的磷肥被大量吸附固定，促进土壤磷素的富集。本研究结果表明，研究区有效磷富集率和富集量均较大的耕地土壤亚类包括淹育水稻土、灰潮土和漂洗水稻土，由于 26 年来这些亚类分别有 86.4%、100%和 81.0%的土壤出现较明显酸化，pH<5.5 的耕地土壤面积分别占相应亚类耕地面积的 53.82%、39.39%和 81.58%[18]，致使这些亚类耕地土壤磷素吸附固定作用强烈，故磷素富集作用明显。而有效磷富集程度最小的耕地土壤亚类包括棕色石灰土和滨海盐土，利用本研究调查数据统计，其 pH 均值分别为 7.0 和 7.5，故磷素固定和富集作用均较弱。可见，研究区耕地土壤酸化差异所致的磷素固定作用强弱，可能对区域耕地有效磷富集的空间分异产生较大影响，致使土壤 pH 成为影响区域耕地土壤有效磷富集的重要因子之一。

有研究表明，土壤磷含量与土粒组成密切相关，黏粒和粉粒含量越高，土壤磷含量也越高[35]。本研究中灰色关联分析发现研究区耕地土壤黏粒及粉粒含量与有效磷富集量的关联度较高，这是由于对磷素具有吸附和固定作用的氧化铁铝等黏土矿物主要分布于细小土粒中，尤其是黏粒中，故土壤质地越黏重，对磷素的吸附和固定作用越强，则磷素富集作用也越明显。据本研究样点属性数据统计，福建省耕地土壤总体偏砂，砂粒含量均值达 56.93%。砂粒的主要成分为石英和长石等，比表面小，对磷素的吸附作用很弱，导致研究区耕地土壤砂粒含量与有效磷富集量的关联度较小，故土壤中对磷素具有较强吸附和固定作用的黏粒和粉粒含量高低必然对其有效磷富集程度产生较大影响。本研究结果表明，研究区有效磷富集程度较高的亚类土壤包括淹育水稻土、灰潮土和漂洗水稻土，其黏粒和粉粒含量之和介于 34%~45%，高于其他亚类的平均水平(18%~42%)，因而具有较高的有效磷的富集量。因此，研究区耕地土壤的磷素富集作用及其差异受黏粒和粉粒，尤其是黏粒含量及其空间差异的影响较为显著。

土壤有机质与土壤有效磷含量呈显著正相关[36]，有机质含量增加可以通过络合和酸溶作用增加磷的活性，进而提高土壤有效磷含量[37]。本研究结果也显示出土壤有机质含量与有效磷富集量存在一定关系，有效磷富集量较低的石灰土、滨海盐土和风砂土等土类，其有机质含量均低于全省耕地土壤有机质含量均值(27.32 g·kg^{-1})；而有效磷富集量较高的土类(如潮土等)，其有机质含量也相对较高。但灰色关联分析结果发现，在所有影响因子中，有机质含量与研究区耕地有效磷富集量的灰色关联系数相对较小，可能是由于研究区地处亚热带、有机质不易积累导致 26 年来耕层土壤有机质含量变化不大。据本研究样点属性数据统计，1982 年与 2008 年研究区耕层土壤(0~20 cm)有机质平均含量变化不大(<7.87 g·kg^{-1})，故有机质含量对研究区耕地土壤有效磷富集影响不明显。此外，研究区耕地土壤磷素富集作用受磷肥施用量等直接因素的影

响更大，而在一定程度上削弱了有机质对土壤磷素富集的间接影响程度。

4 结 论

(1)研究区耕地耕层土壤有效磷富集作用较为显著，耕地土壤有效磷年均富集率和富集量均值分别高达 10.01%和 24.38 mg·kg^{-1}，富集面积占全省耕地总面积的 92.81%，且空间差异较为明显。以有效磷富集率为指标，9 个设区市耕地土壤有效磷富集程度大小顺序为：厦门市>漳州市>三明市>泉州市>福州市>龙岩市>宁德市>莆田市>南平市；耕地土类以潮土的有效磷富集程度最大；亚类以淹育水稻土富集程度最大。

(2)导致研究区耕地土壤有效磷富集及其空间差异的主要因素是年均磷肥施用量、pH、年均气温和黏粒含量，其中以年均磷肥施用量的影响最为显著。因此，研究区耕地土壤磷素富集作用及其空间差异是人为和自然多种因素交互作用所致。

(3)利用不同时期区域耕地土壤调查样点属性分析数据，采用 GIS 与数学模型集成技术研究耕地土壤磷富集作用，能够从空间尺度上科学地揭示区域耕地土壤磷素富集程度、空间差异特征及其影响因素。受土地利用现状资料的限制，本研究采用比例尺较小(1∶25 万)的耕地土壤类型图为基础图层，限制了区域耕地土壤磷素富集作用研究的空间细化。未来可根据研究区域的大小，采用更大比例尺(如 1∶5 万)和土壤样点属性的补充调查，开展区域耕地土壤磷素富集作用的空间细化研究，为区域耕地土壤制定合理的磷肥优化管理措施、实现减量施用化肥和防控磷素迁移所致的环境风险等提供科学依据。

参考文献

[1] 伦飞，刘俊国，张丹，等. 1961-2011 年中国农田磷收支及磷使用效率研究[J]. 资源科学, 2016, 9: 1681-1691
Lun F, Liu J G, Zhang D, et al. Study on phosphorus budget and phosphorus use efficiency of farmland in China[J]. Resources Science, 2016, 9: 1681-1691

[2] 黄绍敏，宝德俊，皇甫湘荣，等. 长期施肥对潮土土壤磷素利用与积累的影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 102-108
Huang S M, Bao D J, Huangfu X R, et al. Effects of long-term fertilization on soil phosphorus utilization and accumulation in fluvo-aquic soil[J]. China Agricultural Sciences, 2006, 39(1): 102-108

[3] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4-6
Lu R K. Soil phosphorus level and water environment protection[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2003, 18(1): 4-6

[4] Sattari S Z, Bouwman A, Giller K E, et al. Residual soil phosphorus as the missing piece in the global phosphorus crisis puzzle[J]. Science, 2012, 109: 6348-6353

[5] Tóth G, Guicharnaud R A, Tóth B, et al. Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use[J]. Agron, 2014, 55: 42-52

[6] Schoumans O F, Bouraoui F, Kabbe C, et al. Phosphorus management in Europe in a changing world[J]. Ambio, 2015, 44: S180-S192

[7] Nieder R, Koster W, Dauck H P. Contribution of agriculture to diffuse inputs of phosphate into the hydrosphere[J]. Wasser Wirtschaft, 2010, 100: 2-25

[8] Reijneveld J A, Ehlert A I, Termorshuizen A J, et al. Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century[J]. Soil Use and Management, 2010, 26(4): 399-411

[9] 方玉东，胡业翠，封志明. 基于 GIS 技术的中国农田磷素养分收支平衡研究[J]. 资源科学, 2008, (5): 725-731
Fang Y D, Hu Y C, Feng Z M. Study on balance of budget and budget of phosphorus in Chinese farmland based on GIS technology[J]. Resources Science, 2008, (5): 725-731

[10] 麻万诸，章明奎，吕晓男. 浙江省耕地土壤氮磷钾现状分析[J]. 浙江大学学报, 2012, 38(1): 71-80
Ma W Z, Zhang M Q , Lv X N. Analysis on present situation of soil nitrogen phosphorus and potassium in cultivated land of Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 38 (1): 71-80

[11] 张慧，高如泰，夏训峰，等. 北京市房山区农田表观磷平衡分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1949-1955
Zhang H, Gao R T, Xia X F, et al. Analysis of apparent phosphorus balance in farmland of Fangshan district, Beijing[J]. Journal of Eco-Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1949-1955

[12] 金明清，彭月月，王佩，等. 四川省盐源县植烟土壤氮磷钾空间变异特征及影响因素[J]. 土壤, 2016, (5): 984-991
Jin M Q, Peng Y Y, Wang P, et al. Spatial variability of nitrogen, phosphorus and potassium in tobacco-planted soils and their influencing factors in Yanyuan county, Sichuan Province[J]. Soil, 2016, (5): 984-991

[13] 袁大刚，张甘霖. 不同利用方式下南京城市土壤碳、氮、磷的化学计量学特征[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (3): 19-25
Yuan D G, Zhang G L. Chemometrics of carbon, nitrogen and phosphorus in urban soils of Nanjing under different uses[J].

China soil and fertilizer, 2013, (3): 19-25
[14] 陈玉东，周健民，邢璐，等. 黑龙江海伦市农田土壤重金属与磷素含量的特征研究[J]. 土壤, 2015, 47(5): 965-972
Chen Y D, Zhou J M, Xing L, et al. Characteristics of heavy metals and phosphorus contents in farmland soils of Hailun City, Heilongjiang Province[J]. Soil, 2015, 47(5): 965-972
[15] 于洋，赵业婷，常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6):1252-1261
Yu Y, Zhao Y T, Chang Q R, Temporal and spatial variability of soil available nutrients in cultivated land of Weibei platform area[J]. Journal of Soil Science, 2015, 52(6): 1252-1261
[16] Yan Z J, Chen S, Li J L, et al. Manure and nitrogen application enhances soil phosphorus mobility in calcareous soil in greenhouses[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 181: 26-35
[17] Shen Z Y, Chen L, Hong Q, et al. Assessment of nitrogen and phosphorus loads and causal factors from different land use and soil types in the three gorges reservoir area[J]. Science of the Total Environment, 2013, 454-455; 383-392
[18] 张秀，张黎明，龙军，等. 亚热带耕地土壤酸化程度差异及影响因素[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(3): 1-11
Zhang X, Zhang L M, Long J, et al. Soil acidification degree difference and impact factors of subtropical cropland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(3): 1-11
[19] 龙军，张黎明，沈金泉，等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1270-1281
Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform[J]. Journal of Soil Science, 2014, 51(6): 1270-1281
[20] 李增兵，赵庚星，赵倩倩，等.县域耕地地力评价中土壤养分空间插值方法的比较研究[J].中国农学通报，2012，28(20): 230–236
Li Z B, Zhao G X, Zhao Q Q, et al. Comparative study on spatial interpolation methods of soil nutrients in farmland fertility evaluation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 230–236
[21] 赵海东，赵小敏，谢林波，等. 江西上饶市水稻肥料利用率的空间差异及其影响因素研究[J]. 土壤学报，2014，51(1): 22-31
Zhao H D, Zhao X M, Xie L B, et al. Spatial variation and its affecting factors of rice fertilizer use efficiency in Shangrao City of Jiangxi Province[J]. Journal of Soil Science, 2014, 51(1): 22-31
[22] 巫顺金. 福建省耕地土壤磷素富集及其生态风险评[D]. 福州：福建农林大学资源与环境学院, 2014: 3-38
Wu S J. Phosphorus enrichment and ecological risk assessment of cultivated land in Fujian Province[D]. Fuzhou: College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, 2014: 3-38
[23] 曾招兵，曾思坚，汤建东，等. 广东省耕地土壤有效磷时空变化特征及影响因素分析[J]. 生态环境学报，2014，23(3): 444-451
Zeng Z B, Zeng S J, Tang J D, et al. Temporal and spatial variation characteristics of soil available phosphorus and its influencing factors in Guangdong Province[J]. Journal of Eco-environment, 2014, 23(3): 444-451
[24] 刘敏英，吕小娜，朱志国，等. 眉山市东坡区土壤有效磷空间变异特征及其影响因素分析[J]. 四川农业科技，2015，(2):31-35
Liu M Y, Lv X N, Zhu Z G, et al. Spatial variability of soil available P in Dongpo District of Meishan City and its influencing factors[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2015, (2): 31-35
[25] 蒋幸萤，兰安军. 天全县耕地土壤有效磷空间分布及其影响因素分析[C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2016 年学术年会论文集. 北京：中国环境科学学会, 2016: 3734-3739
Jiang X Y, Lan A J. Spatial distribution of available phosphorus in cultivated land of Tianquan County and its influencing factors[C]//Chinese Society of Environmental Science. Chinese society of environmental science 2016 academic annual conference proceedings. Beijing: China Environmental Science Society, 2016: 3734-3739
[26] 朱晓晖，杜晓玉，张维理. 有机肥种类对土壤有效磷累积量的影响及其流失风险[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (5): 14-18
Zhu X H, Du X Y, Zhang W L. Effects of organic fertilizer on soil available P accumulation and its risk of loss[J]. China Soil and Fertilizer, 2013, (5): 14-18
[27] 蔡观，胡亚军，王婷婷. 基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2017, (4): 1606-1612
Cai G, Hu Y J, Wang T T. Analysis on characteristics of soil phosphorus components and its influencing factors based on bioavailability[J]. Environmental Science, 2017, (4): 1606-1612
[28] 方睿红，常庆瑞，宋利珍，等. 改进灰色关联模型在秦巴山区耕地地力评价中的应用[J]. 水土保持通报，2012，32(2): 122-126
Fang R H, Chang Q R, Song L Z, et al. Application of improved gray relational model in evaluation of cultivated land fertility in Qinba mountainous area[J]. Soil and Water Conservation Bulletin, 2012, 32 (2): 122-126

[29] 赵宇光, 梁成华, 杜立宇, 等. 长期定位施肥设施土壤微团聚体磷素吸附解吸特征性探讨[J]. 北方园艺, 2009, (5): 1-4
Zhao Y G, Liang C H, Du L Y, et al. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption of soil micro-aggregates in long-term located fertilization[J]. Northern gardening, 2009, (5): 1-4
[30] 陈建. 福建经济与社会统计年鉴-2008[J]. 福州: 福建人民出版社, 2006
Chen J. Fujian economic and social statistical yearbook-2008[J]. Fuzhou: Fujian People's Publishing House, 2006
[31] 王涛, 杨元合, 马文红. 中国土壤磷库的大小、分布及其影响因素[J]. 北京大学学报(自然科学版) , 2008, 44(6): 945-952
Wang T, Yang Y H, Ma W H. Size, distribution and influencing factors of soil phosphorus pool in China[J]. Journal of Peking University(Natural Science Edition), 2008, 44(6): 945-952
[32] 王淑平, 周广胜, 吕育财, 等. 中国东北样带(NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517
Wang S P, Zhou G S, Lv Y C, et al. Gradient distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus in the northeast China transect (NECT) and its relationship with climatic factors[J]. Journal of Plant Ecology, 2002, 26(5): 513-517
[33] 刘方, 黄昌勇, 何腾兵, 等. 长期施肥下黄壤旱地磷对水环境的影响及其风险评价[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 838-844
Liu F, Huang C Y, He T B, et al. Effects of long-term fertilization on soil water environment and its risk assessment[J]. Journal of Soil Science, 2003, 40(6): 838-844
[34] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137-3143
Yu T Y, Sun X S, Shi C R, et al. Advances in research on soil acidification hazard and control technology[J]. Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3137-3143
[35] 栾明明. 城乡交错带土壤磷素空间分布及其影响因素[D]. 成都: 四川农业大学, 2015: 5-40
Luan M M. Spatial distribution of soil phosphorus in urban-rural ecotone and its influencing factors[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015: 5-40
[36] Guppy C N, Menzies N W, Blamey F P C. Do decomorganic P sing organic matter residues phosphorus sorption in highly weathered soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5): 1405-1411
[37] Wang G P, Liu J D, Wang J D, et al. Soil Phosphorus from sand their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China)[J]. Geoderma, 2006, 132: 59-74